

برنامه ریزی آزمایش مودال به منظور انتخاب بهینه نقاط تحریک، پاسخ و تعلیق در سازه های هوایی

سعید ضیایی راد^۱، مهدی صالحی^۲

۱- دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دفتر طراحی هوایی - شرکت صنایع هواپیماسازی ایران

szrad@cc.iut.ac.ir

چکیده

آزمایش های مودال به منظور ایجاد یک مدل ریاضی معتبر برای پیش بینی رفتار دینامیکی سازه ها انجام می شود. با وجود آن که مبانی تئوری آزمایش های مودال بطور کامل گسترش یافته است، با این حال نتایج تجربی نشان می دهد کیفیت نتایج آزمایش می تواند به نحوه چیده مانی آزمایش حساس باشد. مهمترین عواملی که در این رابطه مطرح می شوند نحوه تعلیق سازه، انتخاب نقاط تحریک و اندازه گیری روی سازه می باشند. در این تحقیق، پارامترهایی بر اساس نتایج حاصل از تحلیل مودال توسط نرم افزار اجزای محدود تعریف شده و معیارهایی کمی جهت تعیین موارد اشاره شده در برنامه ریزی آزمایش ارائه می شوند. سپس این تحلیل بر روی دو نمونه سازه واقعی اعمال شده و نتایج عددی حاصل از آن ارائه می گردند. نتایج حاصل با تجارب کاری موجود در زمینه تحلیل مودال همخوانی مناسبی دارد.

واژه های کلیدی: آزمایش - مودال - برنامه ریزی - اجزای محدود.

مقدمه

اولین سوالی که هنگام شروع آزمایش مودال مطرح می شود آن است که چند نقطه اندازه گیری لازم است؟ موقعیت این نقاط چگونه انتخاب می شوند؟ سازه چگونه و از چه نقاطی باید معلق شود؟ بهترین نقاط برای اعمال تحریک سازه کدامند؟ در این مقاله نحوه انتخاب موارد فوق بر اساس معیارهای مربوطه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

بیشتر اوقات تجربه کاری می تواند به این سوالات پاسخ دهد اما گاهی پس از انجام آزمایش و مرور نتایج مشاهده می شود که اندازه گیری در برخی نقاط لزومی نداشته است، و یا اگر در نقاط خاص دیگری اندازه گیری انجام می شد، نتایج بهتری حاصل می گردید [۲]. موارد مشابهی در مورد نحوه تحریک یا تعلیق سازه نیز می تواند مطرح شود. نحوه برنامه ریزی برای آزمایش به هدف نهایی از انجام آزمایش نیز بستگی زیادی دارد. گاهی هدف از آزمایش تنها بدست آوردن فرکانس های طبیعی سازه است اما گاهی اهدافی فراتر مانند استخراج شکل مودها، ضرایب میرایی، مقایسه با نتایج تئوری و یا بروز کردن مدل دینال می شود. بعبارت دیگر قبل از انجام آزمایش باید یک بررسی کلی روی تمام درجات آزادی سیستم و تعداد درجات آزادی اندازه گیری لازم (با توجه به هدف نهایی آزمایش) انجام شود تا کمترین تعداد و بهترین نقاط برای تعلیق، تحریک و اندازه گیری انتخاب شوند [۳].

اصولاً محدوده فرکانسی اندازه گیری بر روی سازه از قبل مشخص است و در نتیجه تعداد محدودی شکل مود سازه ای به کمک آزمایش استخراج می شوند. در حالت کلی نتایج آزمایش نسبت به نتایج تئوری ناکامل است. منابع ایجاد این ناکاملی یکی محدوده فرکانسی انتخاب شده برای آزمایش است (که با تعداد مودهای استخراج شده نسبت مستقیم دارد) و دیگری محدودیت تعداد درجات آزادی اندازه گیری می باشد. تعداد درجات آزادی اندازه گیری عمدتاً به کاربرد نهایی نتایج، تعداد

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- کارشناس ارشد، گروه سازه، دفتر طراحی هوایی، شرکت صنایع هواپیماسازی ایران (هسا)

مودهای مورد نظر برای اندازه گیری و البته محدودیت های عملی بستگی دارد. اما بیشتر روش های اصلاح و بروز کردن (updating) مبتنی بر این امر است که تعداد درجات آزادی اندازه گیری باید از تعداد مودهای مورد نظر بیشتر باشد.

مبانی ریاضی برنامه ریزی آزمایش

پاسخ ماندگار سازه به تحریک های هارمونیک خارجی به شکل $\{f(t)\} = \{F(\omega)\}e^{i\omega t}$ با همان فرکانس تحریک و به شکل $\{x(t)\} = \{X(\omega)\}e^{i\omega t}$ می باشد. معادله حرکت یک سیستم چند درجه آزادی با میرایی سازه ای به شکل زیر نوشته می شود [۱]:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + i[D]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

با جایگذاری $x(t)$ و $f(t)$ می توان نوشت:

$$(-\omega^2 [M] + i[D] + [K])\{X(\omega)\} = \{F(\omega)\} \quad (2)$$

$$\{X(\omega)\} = [\alpha(\omega)]\{F(\omega)\}, \quad [\alpha(\omega)] = (-\omega^2 [M] + i[D] + [K])^{-1} \quad (3)$$

ماتریس $[\alpha(\omega)]$ در رابطه فوق به رسپتانس موسوم است که درایه های آن را می توان بر حسب فرکانس های طبیعی و شکل مودها بصورت زیر نوشت [۲]:

$$\alpha_{jk}(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{\phi_{j,r}\phi_{k,r}}{\omega_r^2 - \omega^2 + i\eta_r\omega_r^2} \quad (4)$$

با فرض این که سازه در فرکانسی برابر با فرکانس طبیعی r ام (ω_r) تحریک شود می توان نوشت [۲]:

$$\alpha_{jk}(\omega_r) \approx \frac{\phi_{j,r}\phi_{k,r}}{i\eta_r\omega_r^2} \quad (5)$$

و با توجه به رابطه (۳) می توان نوشت:

$$X(\omega_r) \propto \frac{\phi_{i,r}\phi_{j,r}}{i\eta_r\omega_r^2} \quad (6)$$

از طرفی جابجایی، سرعت و شتاب توسط روابط زیر به هم مربوط می شوند:

$$x(t) = X(\omega_r)e^{i\omega_r t} \quad (7)$$

$$\dot{x}(t) = i\omega_r X(\omega_r)e^{i\omega_r t}$$

$$\ddot{x}(t) = -\omega_r^2 X(\omega_r)e^{i\omega_r t}$$

و در نهایت با توجه به روابط (۱۴) می توان نوشت:

$$\text{دامنه جابجایی} \propto \frac{\phi_{i,r}\phi_{j,r}}{\omega_r^2}$$

$$\text{دامنه سرعت} \propto \frac{\phi_{i,r}\phi_{j,r}}{\omega_r}$$

$$\text{دامنه شتاب} \propto \phi_{i,r}\phi_{j,r}$$

با توجه به پیچیدگی ساختاری میرایی و اینکه در تحلیل تئوریک مقدماتی اطلاعات زیادی از میرایی سازه بدست نمی آید، عبارت های میرایی در روابط فوق حذف شده است. روابط فوق با فرض آنکه سازه در فرکانسی نزدیک به فرکانس رزونانس ارتعاش می کند، بدست آمده است. اما همانطور که می دانیم عملاً هنگام آزمایش، تحریک از نوع ضربه یا تصادفی است و پاسخ ارتعاشی حاصله شامل چندین فرکانس رزونانس است. هنگامی که یک سازه تحت اثر نیروی خارجی ارتعاش می کند، دامنه ارتعاش

مربوط به هر درجه آزادی در حوزه زمان، تابعی از پارامترهای سازه ای و محرک ورودی می باشد. به ازای یک تحریک مشخص که تمام مودهای واقع در محدوده فرکانسی مورد مطالعه را تحریک می نماید، پاسخ جابجایی متوسط برای هر درجه آزادی سازه از پارامتر ADDOFD که بصورت میانگین مجموع تمام مودهای شرکت کننده در پاسخ تعریف می شود، استفاده می کنیم [۳]:

$$ADDOFD(j) = \sum_{r=1}^m \frac{\phi_{j,r}^2}{\omega_r^2} \quad (8)$$

این پارامتر برای سرعت و شتاب نیز بصورت زیر تعریف می شود:

$$ADDOFV(j) = \sum_{r=1}^m \frac{\phi_{j,r}^2}{\omega_r} \quad (9)$$

$$ADDOFA(j) = \sum_{r=1}^m \phi_{j,r}^2 \quad (10)$$

پارامترهای فوق بیانگر میانگین دامنه پاسخ سیستم به یک تحریک ضربه ای ایده آل است که در آن تمام مودهای سازه تحریک می شوند.

موقعیت های بهینه تعلیق

در این پروسه شرایط مرزی و نحوه اعمال آنها به سازه تعیین می شود. اغلب آزمایش های مودال با شرایط مرزی آزاد-آزاد انجام می شوند. بهترین شرایط برای مدلسازی این شرط مرزی، قرار دادن سازه روی فنرهای نرم است. مساله اصلی تعیین نقاطی است که این فنرها را به سازه متصل می کند زیرا اتصال یک فنر می تواند خواص دینامیکی سازه را تغییر داده و روی پاسخ سازه تاثیر بگذارد. بنابراین حالت مطلوب بر روی سازه انتخاب نقاطی است که تغییر مکان کلی ناشی از سهم مودهای مورد نظر در آنها تا حد امکان کم باشد. این بدان معناست که اگر نقطه یا نقاطی در خلال تحریک (در فرکانسهای مختلف) دارای تغییر مکان کمی باشند، در آنصورت آن نقاط را میتوان بعنوان نقاط مناسبی برای تعلیق انتخاب کرد.

با استفاده از پارامتر ADDOFD معیار مورد نظر بصورت زیر تعریف می شود:

$$\text{Optimum Suspension} = \min(\text{ADDOFD}(j)) \quad (11)$$

این رابطه بر اساس بدترین حالت یعنی مشارکت تمام مودهای محدوده فرکانسی در پاسخ یک نقطه از سازه می باشد. در عمل ممکن است تعدادی از مودها در پاسخ وجود نداشته باشند که در این صورت ADDOFD مقدار کمتری خواهد داشت و تقریب بهتری از مساله حاصل خواهد شد. اگر مقدار پارامتر ADDOFD کوچک باشد، این به مفهوم آن است که نقطه تعلیق تغییر مکان کمی در محدوده فرکانسی مورد نظر داشته و بنابراین تاثیر فنرهای تعلیق بر روی سازه بسیار کم است.

نقاط بهینه تحریک

عمدتا تحریک سازه به کمک چکش ضربه ای و یا اتصال سازه به یک لرزشگر صورت می گیرد. مهمترین نکته در پروسه انتقال انرژی به سازه، عدم ایجاد صدمه در سازه مورد آزمایش است. مساله آسیب دیدگی سازه بیشتر هنگامی مطرح می شود که آزمایش با چکش و به منظور تحریک مودها با فرکانس بالا انجام شود. برای احتراز از ضربه مکرر (double-hit) و کاهش زمان ضربه به منظور تحریک مودهای فرکانس بالا، لازم است از سرچکش فلزی سخت استفاده شود. آسیب دیدگی سازه در آزمایش با لرزشگر و در مورد سازه هایی با میرایی ضعیف نزدیک فرکانس های رزونانس نیز بطور جدی مطرح می شود.

اگر منبع تحریک روی نقاط گرهی و یا نزدیک به نقاط گرهی یک مود خاص قرار گیرد، مود مورد اشاره تحریک نشده و در پاسخ اثری از آن مشاهده نخواهد شد. از دیگر پدیده هایی که به انتخاب نقطه تحریک بستگی دارد ضربه مکرر (double-hit) در تحریک با چکش و همچنین برهم کنش سازه و محرک در تحریک با لرزشگر می باشد. در تحریک با چکش علاوه بر ملاحظات مربوط به عدم قرار گرفتن نقطه تحریک روی نقاط گرهی، باید از نواحی با ADDOFV بالا احتراز شود زیرا تحریک در این نواحی احتمال بروز ضربه مکرر (double-hit) را افزایش می دهد. در مورد تحریک با لرزشگر، علاوه بر ملاحظات

عمومی باید برهم کنش لرزشگر و سازه حین آزمایش به حداقل رسانده شود. با در نظر گرفتن لرزشگر بعنوان یک جرم-فنر-مستهلک کننده که به سازه متصل شده است، این تاثیر متقابل در نواحی که دارای کمترین شتاب است به حداقل می رسد یعنی نقاط اتصال لرزشگر به سازه باید دارای حداقل مقدار ADDOFA باشند.

برای شناسایی نقاط نزدیک و یا روی گره ها با توجه به این که ضرایب ثابت مودال در نقاط یاد شده نزدیک به صفر می باشند، تمام این ضرایب در هر درجه آزادی در هم ضرب شده و پارامتری به نام ODP را تشکیل می دهند:

$$ODP(i) = \prod_{r=1}^m \|\phi_{j,r}\| \quad (12)$$

نقاطی که دارای ODP نزدیک به صفر می باشند، نزدیک نقاط گرهی شکل مودها قرار داشته و برای تحریک باید از این نقاط احتراز شود و سایر نقاط از نظر شرایط دیگر بررسی شوند.

برای تعیین نقاط نامناسب تحریک پارامتر NODP برای هر درجه آزادی تعریف می شود که بیانگر میزان نزدیک بودن آن درجه آزادی به یکی از خطوط گرهی هر یک از مودهای سازه بوده و بصورت زیر بیان می شود:

$$NODP(i) = \min_r (\|\phi_{i,r}\|) \quad (13)$$

NODP معیاری برای نامناسب بودن DOF مورد نظر برای اعمال تحریک است. بنابراین اگر یکی از درجات آزادی دارای NODP پایینی باشد نشانگر آن است که این نقطه برای اعمال تحریک مناسب نمی باشد اما بالا بودن NODP لزوماً نشانگر مناسب بودن برای اعمال تحریک نمی باشد.

بنابراین با ترکیب مطالب بیان شده، دو روش بر مبنای ODP و NODP برای تعیین نقاط بهینه تحریک توسط چکش و لرزشگر بصورت زیر ارائه می شود:

الف) روش ODP

در این روش پارامترهایی که بصورت زیر تعریف می شوند، نقاط بهینه تحریک را تعیین می نمایند:

$$ODP - D(j) = \frac{ODP(j)}{ADDOFD(j)} \quad (14)$$

$$ODP - V(j) = \frac{ODP(j)}{ADDOFV(j)} \quad (15)$$

$$ODP - A(j) = \frac{ODP(j)}{ADDOFA(j)} \quad (16)$$

معادله (۱۵) برای تحریک توسط چکش مورد استفاده قرار می گیرد. این تعریف به گونه ای است که نقاط انتخاب شده تا حد امکان روی شکمها قرار داشته و از نقاط با سرعت بالا نیز احتراز شود تا احتمال بروز ضربه مکرر را به حداقل برساند. معادله (۱۶) برای تحریک توسط لرزشگر است تا ضمن تحریک نقاط بر روی شکمها، تاثیر متقابل لرزشگر و سازه را به حداقل برساند.

ب) روش NODP

در این روش پارامترهایی که بصورت زیر تعریف می شوند در انتخاب نقاط بهینه تحریک موثرند:

$$NODP - D(j) = \frac{NODP(j)}{ADDOFD(j)} \quad (17)$$

$$NODP - V(j) = \frac{NODP(j)}{ADDOFV(j)} \quad (18)$$

$$NODP - A(j) = \frac{NODP(j)}{ADDOFA(j)} \quad (19)$$

نقاط بهینه اندازه گیری

برای گرفتن پاسخ های مناسب در آزمایش لازم است نسبت سیگنال به نویز ماکزیمم شود. بنابراین نقاط نزدیک نواحی گره ای مودها بدلیل دامنه کوچک پاسخ برای اندازه گیری مناسب نمی باشند. قبل از اعمال پروسه برنامه ریزی آزمایش باید نوع پاسخ اندازه گیری شده از سازه (جابجایی، سرعت، شتاب) مشخص شود. البته اغلب پارامتر شتاب بعنوان خروجی اندازه گیری می شود. در این حالت نواحی که پارامتر ADDOFA بزرگتر باشد برای اندازه گیری مناسب تر می باشد. ولی اگر پاسخ توسط لیزر اندازه گیری شود در آنصورت عامل مهم سرعت بوده (به دلیل استفاده از پدیده دوپلر در اندازه گیری سرعت ارتعاش نقاط) و پارامتر مورد استفاده ADDOFV است [۴]. برای پیدا نمودن نقاط بهینه اندازه گیری میزان مشارکت درجه آزادی قابل اندازه گیری در هر شکل مود بایستی مشخص شود. سپس از بین این نقاط، آنهایی که دارای حداکثر تاثیر می باشند محاسبه و بعنوان بهترین نقاط در اختیار کاربر قرار گیرند. به همین منظور دو پارامتر زیر برای این کار معرفی می گردند.

(الف) روش امیدانس مؤثر (Effective Independence or EI)

اگر ماتریس اولیه شکل مودها (تنها درجات آزادی قابل اندازه گیری در این ماتریس لحاظ می شود) $[\phi]_{N \times m}$ باشد ماتریس A که به ماتریس اطلاعات فیشر (Fisher Information Matrix) موسوم است بصورت زیر تعریف می شود [۵]:

$$[A]_{m \times m} = [\phi]_{m \times N} [\phi]_{N \times m} \quad (20)$$

ماتریس پیش بینی (Prediction Matrix) [E] بصورت زیر تعریف می شود [۶]:

$$[E]_{N \times N} = [\phi]_{N \times m} [A]_{m \times m}^{-1} [\phi]_{m \times N}^T \quad (21)$$

[E] یک ماتریس متقارن و خودتوان (idempotent) می باشد و شرایط زیر را ارضا می نماید [۷]:

$$\text{trace}([E]) = \text{rank}([E]) = \text{rank}([\phi]) = m \quad (22)$$

$$[E]^2 = [E] \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N e_{ij}^2 = m \quad (24)$$

$$\text{for all } i \quad 0 \leq e_{ii} \leq 1 \quad (25)$$

$$\text{for all } i \neq j \quad -0.5 \leq e_{ij} \leq 0.5 \quad (26)$$

هر المان قطری در ماتریس [E] میزان مشارکت درجه آزادی مربوطه را در ماتریس شکل مود نشان می دهد. کوچکترین المان قطری در این ماتریس، درجه آزادی با کمترین مشارکت در شکل مودها را نشان می دهد. این درجه آزادی حذف شده و ماتریس [E] مجددا محاسبه می شود. این پروسه حذف کوچکترین المان قطری تا زمانی که رتبه ماتریس شکل مودها با تعداد مودهای موجود در این ماتریس برابر شود تکرار خواهد شد.

اگر تعداد درجات آزادی سازه بزرگ باشد پروسه فوق زمان زیادی از CPU خواهد گرفت و برای کاهش این زمان می توان در هر مرحله چندین حذف بطور همزمان انجام داد، اما با این کار لزوماً نقاط بهینه اندازه گیری بدست نخواهد آمد.

(ب) روش ADDOFA-EI

روش EI ابزاری قدرتمند برای انتخاب بهینه نقاط اندازه گیری به منظور بدست آوردن مودهایی با حداکثر استقلال خطی از یکدیگر می باشد. در روش EI پروسه بهینه سازی بر اساس یافتن حداقل نقاط ممکن و بدون توجه به سایر شرایط خاص هریک از نقاط است و ممکن است نقاط انتخاب شده دارای پاسخی ضعیف (مقدار ADDOFA پایین) باشند. به همین دلیل روش ADDOFA-EI که هر دو معیار فوق را ارضا می نماید توسعه داده شده است. هدف این روش مانند متد EI آن است که ماتریس شکل مودها باید دارای رتبه کامل (full rank) باشد. در این روش مقادیر ADDOFA مربوط به هر درجه آزادی در عنصر قطری متناظر در ماتریس [E] ضرب می شود:

$$[E^{addofa}]_{N \times N} = [E]_{N \times N} \text{diag}([ADDOFA]) \quad (27)$$

$$e^{addofa}_{ii} = e_{ii} ADDOFA(i), i = 1, N \quad (28)$$

درجات آزادی بهینه اندازه گیری با حذف کوچکترین e^{addofa}_{ii} در هر تکرار تا رسیدن رتبه ماتریس شکل مودها به تعداد مودهای موجود در این ماتریس بدست می آید. در این روش درجات آزادی که ADDOFA کوچکی دارند نسبت به روش EI به مراتب شانس بیشتری برای حذف شدن دارند.

برنامه ریزی آزمایش مودال دسته موتور یک هواپیمای آموزشی

سازه دسته موتور هواپیمای S-68، موتور را به فریم بدنه متصل نموده و همچنین بعنوان تکیه گاه ارا به فرود جلویی بکار می رود. شکل (۱) شمایی از این سازه را نشان می دهد. شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای آزمایش مودال این سازه، بصورت آزادی باشد. تحلیل مودال این سازه در نرم افزار انسیس (ANSYS) انجام شده و از نتایج آن برای برنامه ریزی آزمایش استفاده می شود. بازه فرکانسی آزمایش، از صفر تا ۳۳۰ هرتز در نظر گرفته می شود [۸]. شکل (۲) بهترین نقاط تعلیق را با توجه به می نیم سازی پارامتر ADDOFD نشان می دهد. نقاطی که با رنگ تیره نشان داده شده اند، مناسبترین نقاط برای تعلیق سازه هستند. البته از بین مجموعه این نقاط، سه نقطه که تعلیق سازه در آنها راحت تر بود، به عنوان نقاط تعلیق انتخاب شدند. شکل (۳) نقاط مناسب تحریک با چکش را بر اساس کمترین مقدار ODP/ADDOFV و بیشترین مقدار NODP/ADDOFV نشان می دهد. از بین این مجموعه نقاط، یک نقطه که دارای وضعیت دسترسی بهتری نسبت به بقیه بود، انتخاب و ضربه در آن نقطه وارد گردید. شکل (۴) وضعیت نقاط مختلف برای تحریک با لرزشگر بر اساس کمترین مقدار ODP/ADDOFA و بیشترین مقدار NODP/ADDOFA نشان داده شده اند و نهایتاً شکل (۵) وضعیت نقاط مختلف را برای اندازه گیری با شتاب سنج بر مبنای مقادیر بالای ADDOFA، EI*ADDOFA و EI*NODP را نشان می دهد. کلیه این نقاط بعلاوه تعداد دیگری نقطه برای نمایش بهتر شکل مودها انتخاب گردیدند.

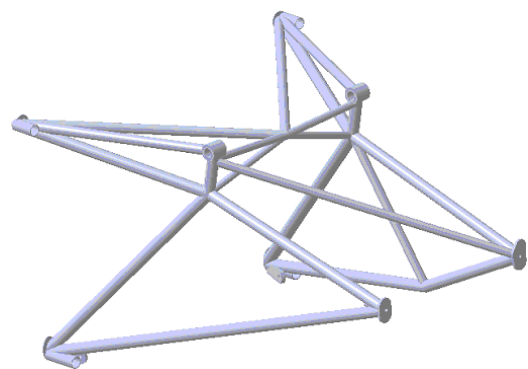
برنامه ریزی آزمایش مودال پروانه (impeller)

در این قسمت هدف برنامه ریزی آزمایش مودال پروانه یک توربوماشین محوری می باشد. از آنجایی که ارتعاش پروانه در حین کار بر روی مدل‌های ساخته شده زیاد بود، تصمیم به تحلیل سازه و طراحی مجدد و یا اصلاح طرح اولیه آن گرفته شد. برای مشخص نمودن واقعی فرکانسهای طبیعی سازه انجام آزمایش مودال پیشنهاد گردید. قبل از انجام آزمایش و بمنظور دستیابی به بهترین اطلاعات در حین آزمایش، برنامه ریزی آزمایش مودال انجام گرفت. نتایج آزمایش مودال بر روی سازه در گزارش مجزایی آورده شده است [۹]. در این مقاله نتایج حاصل از برنامه ریزی آزمایش مودال ارائه می گردد. شمایی کلی از سازه مورد نظر در شکل (۶) نشان داده شده است. پروانه از جنس آلومینیوم و دارای نوزده پره می باشد. شکل (۷) مدل اولیه المان محدود سازه را که توسط المانهایی مکعبی ۸ گرهی مدل شده، نمایش می دهد. برای برنامه ریزی آزمایش مودال از اطلاعات حاصل از این مدل استفاده شده است. شکل (۸) اندازه پارامتر ADDOFD نقاط مختلف را با رنگهای متفاوت نشان می دهد. این به مفهوم آن است که باید تعلیق سازه از نقاطی که با رنگ آبی پر نشان داده شده اند، انجام گیرد. در آنصورت اثر اجزاء تعلیق بر روی سازه می نیم و شرایط آزاد-آزاد سازه بهتر تامین خواهند شد. شکل (۹) نمودار ODP را برای سازه فوق الذکر نشان می دهد. از این نمودار به همراه ADDOFV (در اینجا آورده نشده) نقاط بهینه تحریک برای ضربه توسط چکش مشخص می گردند. همانطور که از شکل مشخص است برای داشتن نتایج رضایت بخش ضربه چکش بایستی در نقاطی در نزدیکی نوک پره ها زده شود. آزمایش عملی نیز نشان داد که در صورت اعمال ضربه بر روی بدنه پروانه، منجر به نتایجی با نویز زیاد می گردد. شکل (۱۰) نقاط بهینه برای نصب شتاب سنج بر روی سازه را نشان می دهد. برای محاسبه این نتایج فرض شده است که ۴۴ مود اول سازه برای ما مهم بوده و حداکثر تعداد ۷۷ نقطه توسط کاربر بر روی سازه اندازه گیری می شود. نقاطی که برنامه برای اندازه گیری پیشنهاد نموده در شکل با دایره های توپر نمایش داده شده اند.

نتیجه گیری

برنامه ریزی آزمایش مودال بر روی سازه های پیچیده قبل از انجام آزمایش می تواند منجر به صرفه جویی قابل توجهی در زمان آزمایش و استفاده بهینه از امکانات آزمایش گردد. برای این منظور یک مدل اولیه المان محدود جسم تهیه و محاسبات بر اساس آن انجام می گردد. در این مقاله اصول ریاضی برنامه ریزی آزمایش مودال برای اندازه گیری توسط وسایل متفاوت نظیر شتاب سنج، لیزری و تحریک توسط چکش و لرزشگر بیان شدند. نتایج بر روی دو نمونه صنعتی مورد استفاده در صنایع هوافضا آزمایش گردید. نتایج نشان می دهد که جوابهای حاصل با تجارب شخصی و فردی تطابق خوبی داشته و بنابراین می توان با اطمینان از آنها برای سازه های پیچیده تر که تجربه کاری کمتر جوابگوست و یا توسط اشخاصی که تجربه زیادی در آزمایش مودال ندارند، مورد استفاده قرار گیرند.

شکل ها

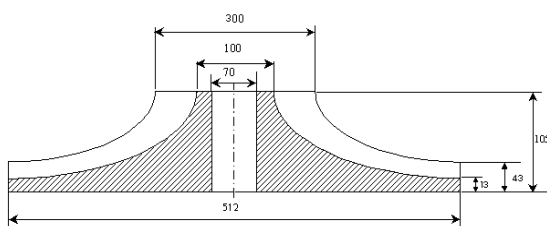


شکل ۱- سازه نگهدارنده موتور هواپیما

شکل ۲- نقاط بهینه تعلیق

شکل ۳- نقاط بهینه تحریک با چکش

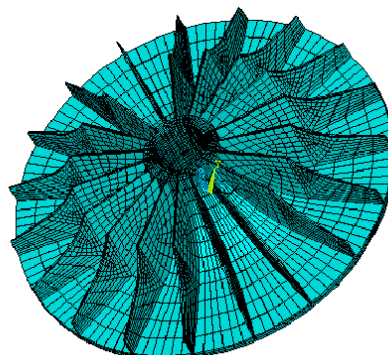
شکل ۴- نقاط بهینه تحریک با لرزشگر



شکل ۶- پروانه یک توربوماشین محور

شکل ۵- نقاط بهینه اندازه گیری شتاب

Discard



Select

شکل ۸-نمودار ADDOFD پروانه

شکل ۷- مدل المان محدود پروانه

Discard

Select

شکل ۱۰-نمودار ADDOF-EI پروانه (۴۴ مود و ۷۷ درجه آزادی)

شکل ۹-نمودار ODP پروانه

مراجع

- 1- Ginsberg, J. H., "Mechanical and Structural Vibrations", First ed., John Wiley & Sons, 2001
- 2- Ewins D.J., "Modal Testing :Theory, Practice and Applications", 2nd ed., Research Studies Press LTD., London, 2000.
- 3- Imamovic N., "Validation of Large Structural Dynamics Models Using Modal Test Data", PhD Thesis, Imperial College of London, 1998.
- 4- Ziaei Rad, S. and Ewins, D. J., "Measuring RDOFs using Laser Doppler Vibrometer", Tools for Noise and Vibration Analysis, Proc. of ISMA 25, Leuven, Belgium , 2000
- 5- Kammer, D.C., "Sensor Placement for On-Orbit Modal Identification and Correlation of Large Space Structures", Journal of Guidance, Control and Dynamics, 14(2),251-259, 1991
- 6- Imamovic, N., Ewins, D.J., "Optimization of Excitation DOF Selection for Modal Test", 15th IMAC, 1997.
- 7- Soderstrom, T., Stoica, P., "System Identification", Prentice Hall Informational Series in Systems and Control Engineering, London, 1989
- ۸- ضیایی راد، سعید، و صالحی، مهدی، " آزمایش مودال دسته موتور هواپیمای S68"، گزارش فنی، دفتر طراحی هوایی، شرکت صنایع هواپیماسازی ایران (هسا)، ۱۳۸۲.
- 9- Ziaei Rad, S. and Stanbridge, A. B., "Modal Tests on a Centrifugal Impeller", Centre of Vibration Engineering, Imperial College, Reprot No. VUTC/D/98010, 1998